

Design of Induction Switched Reluctance Motor for Propulsion Electric Bus**Ali Madani Mohammadi, Ph.D. Student, Mohammadali Abbasian, Assistant Professor, Majid Delshad, Associate Professor, Hadi Saghafi, Assistant Professor**

Department of Electrical Engineering- Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Khorasgan, Isfahan, Iran

a.madani.m@khuif.ac.ir, m.abbasian@khuif.ac.ir, delshad@khuif.ac.ir, h.saghafi@khuif.ac.ir

Abstract

In recent years, metropolises around the world have seen a declining trend in the air quality index. Much of this pollution is related to public transportation. Upgrading public transportation can be a way out of this impasse. Due to environmental concerns, it is recommended to switch from conventional diesel buses to electric buses, which have several benefits in terms of reducing pollution, noise and fuel. In this paper, a high power induction switched reluctance motor used in a city electric bus is studied. The stator and rotor structure of this electric car is non-segmental. The structure is such that a short magnetic flux path is created in the rotor and stator core. As a result, high torque is produced with low losses. Since the electric motor has a very high power, it therefore requires a large amount of permanent magnets, so it is desirable that the electric motor in the electric bus does not have a permanent magnet. Here is a three-phase induction switched reluctance motor with a power of 220 kW, with 6 stator poles and 4 rotor poles. A two-dimensional finite element model is designed and its magnetic analysis is performed. The flux path, torque and efficiency of the induction switched reluctance motor are calculated and the results are presented.

Keywords: electric bus, switched reluctance motor, finite element analysis, short flux path, torque**Received:** 17 September 2020**Revised:** 18 October 2022**Accepted:** 22 December 2022**Corresponding Author:** Dr. Mohammadali Abbasian

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1403.15.58.7.8>

مقاله پژوهشی

طراحی موتور سوئیچ رلوکتانس القایی پیشران برای اتوبوس برقی

علی مدنی-محمدی، دانشجوی دکتری، محمدعلی عباسیان، استادیار، مجید دلشاد، دانشیار، هادی ثقفی،
استادیار

دانشکده مهندسی برق- واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، خوراسگان، اصفهان، ایران
a.madani.m@khuisf.ac.ir, m.abbasian@khuisf.ac.ir, delshad@khuisf.ac.ir, h.saghafi@khuisf.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر، کلان شهرها در سراسر جهان شاهد روند کاهشی در شاخص کیفیت هوا بوده‌اند. بخش زیادی از این آلودگی مربوط به وسایل حمل و نقل عمومی است. ارتقای حمل و نقل عمومی می‌تواند راه‌کاری برای خروج از این بن‌بست باشد. به دلیل نگرانی‌های زیست‌محیطی، توصیه می‌شود به تغییر اتوبوس‌های دیزلی معمولی به اتوبوس‌های برقی، که دارای مزایای متعددی از نظر کاهش آلودگی، صدا و سوخت هستند. در این مقاله یک موتور سوئیچ رلوکتانس القایی توان بالا که در اتوبوس برقی استفاده می‌شود مورد مطالعه قرار گرفته است. ساختار استاتور و روتور این ماشین الکتریکی غیر سگمنتال است. ساختار به گونه‌ای است که مسیر شار مغناطیسی کوتاه در روتور و هسته استاتور ایجاد شده است. در نتیجه گشتاور بالا با تلفات کم تولید می‌شود. از آنجایی که موتور الکتریکی مورد استفاده برای اتوبوس برقی دارای توان بسیار بالا است، در نتیجه نیاز به مقدار زیادی آهنربای دائم دارد. لذا مطلوب است که موتور الکتریکی برای اتوبوس برقی فاقد آهنربای دائم باشد. در این مطالعه یک موتور سوئیچ رلوکتانس القایی سه فاز با توان ۲۲۰ کیلووات، با ۶ قطب استاتور و ۴ قطب روتور در نظر گرفته شده است. یک مدل المان محدود دو بعدی طراحی شده و تجزیه و تحلیل مغناطیسی آن انجام می‌گیرد. مسیر شار، گشتاور و بازده موتور سوئیچ رلوکتانس القایی محاسبه شده و نتایج ارائه شده است.

کلمات کلیدی: آنالیز المان محدود، اتوبوس برقی، گشتاور، مسیر شار کوتاه. موتور سوئیچ رلوکتانس

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۲۶

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمدعلی عباسیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: اصفهان - خیابان جی شرقی - ارغوانیه - بلوار دانشگاه - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان

۱- مقدمه

وسایل نقلیه الکتریکی انواع چالش‌ها و فرصت‌های توسعه اقتصادی و فناوری تاثیرگذار را ایجاد می‌کنند. پیشرفت‌های اخیر در حوزه‌های ذخیره‌سازی انرژی، ساختار موتور، مدارهای الکترونیک قدرت و منابع انرژی تجدیدپذیر نشان می‌دهد که وسایل نقلیه الکتریکی برای تغییر شکل به وسایل نقلیه پاک برای محیط زیست آماده‌اند. بر خلاف وسایل نقلیه سنتی بر پایه سوخت، وسایل نقلیه الکتریکی به هیچ موتور احتراق داخلی وابسته نیستند. بلکه تمام نیرو از انرژی الکتریکی ذخیره شده در باتری‌ها برای به حرکت درآوردن موتورهای مطلوب به دست می‌آید. یکی از مشکلات اصلی وسایل نقلیه الکتریکی ذخیره - سازی انرژی است. اما پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های باتری به حدی رسیده است که این مسائل در مورد باتری‌ها بی‌اهمیت شده‌اند. انگیزه اصلی برای سرمایه گذاری منابع بیشتر در توسعه خودروهای الکتریکی، بحران انرژی فسیلی است. انقلاب صنعتی نقش بسزایی به ضرورت این تغییر در حمل و نقل مردم و کالاها ایفا کرده است [۱]. تحقیقات نشان داده که آلودگی وسایل نقلیه یکی از عوامل اصلی گرم شدن کره زمین است. اتومبیل‌ها و کامیون‌ها دی اکسید کربن و سایر گازهای گلخانه‌ای را منتشر می‌کنند. گازهای گلخانه‌ای باعث افزایش دما در سطح جهان می‌شود.

حمل و نقل عمومی یکی از تاثیرگذارترین عوامل محیط زیست سالم محسوب می‌شود. آمار نشان می‌دهد که اتوبوس‌های عمومی حجم زیادی از انرژی فسیلی را مصرف می‌کنند. به عنوان مثال در هند سالانه ۴۰ هزار لیتر گازوئیل توسط یک اتوبوس مصرف می‌شود که معادل بیش از ۱۰۰ تن دی اکسید کربن است [۲]. از این رو، بهبود ساختار حمل و نقل عمومی فوریت پیدا کرده که می‌توان با جایگزینی خودرو برقی این ساختار را اصلاح نمود. همچنین سرمایه‌گذاری در اتوبوس‌های برقی با توجه به میانگین زمان کارکرد این وسایل حمل و نقل تقریباً ۱۶ ساعت در روز، تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد [۳]. اتوبوس‌های برقی برای حمل و نقل عمومی در سراسر جهان کاربرد دارند. ساخت اتوبوس‌های برقی بر اساس همان بدنه اتوبوس‌های دیزلی معمولی است. برای حمل و نقل منظم در داخل شهر، به حداقل رساندن وزن بدون بار و چرخش اتوبوس برقی بسیار مهم است. زیرا بار موتورهای الکتریکی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. برای به حداقل رساندن وزن بدنه، آلومینیوم به عنوان ساختار اصلی پیشنهاد شده است. شاسی اتوبوس برقی به دلیل استحکام و خواص ضد خوردگی عالی در محیط‌های سخت از فولاد ساخته شده است. دو درب با سکوها بزرگ در قسمت جلو و عقب بدنه، جهت ورود و خروج مسافری به اتوبوس در نظر گرفته شده است. حداکثر ظرفیت اتوبوس برای ۴۰ مسافر به همراه راننده است. ابعاد بدنه طول ۱۵ متر، عرض ۲/۵ متر، ارتفاع ۳ متر و ۱۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

هنگام تعیین وزن تقریبی ناخالص اتوبوس، وزن‌های مجاز از اطلاعات اتوبوس‌های دیزلی گرفته می‌شود. اگرچه فقط وزن‌های محدود در نظر گرفته می‌شود، اما همچنان می‌تواند مبنای معتبری برای طراحی اتوبوس برقی فراهم کند، زیرا وزن خالی اتوبوس‌های دیزلی و الکتریکی، به استثنای باتری و تجهیزات شارژ، تقریباً برابر هستند. ظرفیت اتوبوس برقی پیشنهادی تقریباً ۱۷۵۰۰ کیلوگرم و وزن محدود آن حدود ۱۰ هزار کیلوگرم است. این مشخصه را می‌توان برای اتوبوس الکتریکی ۱۵ متری پیشنهاد داد [۴]. حداکثر سرعت اتوبوس حدود ۷۵ کیلومتر در ساعت است و میانگین سرعت رانندگی مورد انتظار در جاده - های شهری با توجه به محدودیت‌ها در حدود ۵۰ کیلومتر در ساعت است. برای اتوبوس پیشنهادی، شتاب حدود ۰/۷ متر بر مربع ثانیه است زیرا در چنین شتابی که مسافران ایستاده‌اند، سقوط نمی‌کنند. پیشنهاد پیشرانه برای طراحی یک خودروی تمام برقی است. مزایای اصلی خودروی برقی با داشتن باتری این است که به طور کامل با یک منبع انرژی ارزان و نسبتاً پایدار کار می‌کند، به دلیل کاهش قطعات متحرک به تعمیر و نگهداری کمی نیاز دارد و استفاده بهینه از انرژی با استفاده از یک پدال محرک امکان‌پذیر می‌شود. نقطه ضعف این است که یک باتری بزرگ برای مدت طولانی مورد نیاز است. حداکثر مدتی که باید طی شود حدود ۴۰ الی ۵۰ کیلومتر است. یک پیشرانه خودروی الکتریکی با باتری شامل یک شارژر داخل یا خارج از برد، مبدل باتری کششی، مبدل باتری کمکی و یک موتور درایو است. پیشرانه استفاده شده از نوع محرک تمام چرخ با پیکربندی دو موتوره است. مدل محرک تمام چرخ، گشتاور بیشتر و ظرفیت بکسل بیشتر را فراهم می‌کند که از ویژگی‌های مطلوب در اتوبوس برقی است. این امر باعث کاهش هزینه و وزن می‌شود. طرح پیشنهادی از یک سیستم محرک تمام چرخ موقت استفاده

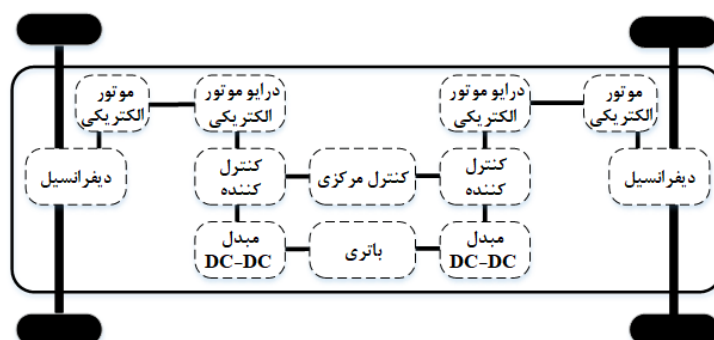
می‌کند که می‌تواند با نظارت بر شرایط جاده و رفتار راننده تصمیم بگیرد که چه زمانی ارسال گشتاور فقط به محور جلو منطقی است.

هنگامی که اتوبوس از حالت سکون در یک ایستگاه شلوغ شروع به کار می‌کند، موتور عقب احتمالاً بار زیادی تحمل می‌کند. از این‌رو جریان زیادی از باتری کشیده می‌شود. این امر می‌تواند به موتور آسیب برساند. برای جلوگیری از این حالت، اتوبوس برقی موقع شروع حرکت، بار را بین موتور جلو و عقب به‌طور مساوی تقسیم می‌کند. در این حالت اتوبوس سرعت بیشتری می‌گیرد. شماتیک اتوبوس برقی در شکل (۱) نشان داده شده است.

چرخ‌های جلو، در طول سفر نیاز نیست همیشه درگیر باشند. ماشین‌های الکتریکی مختلفی برای کاربرد وسایل نقلیه معرفی شده‌اند. ماشین‌های الکتریکی مورد استفاده در وسایل نقلیه با کارایی و گشتاور بالا، مانند ماشین‌های سنکرون آهنربای دائم استفاده می‌شوند. این ماشین‌ها از آهنربای دائمی بهره می‌برند که حاوی مواد کمیاب حاکی مانند نئودیمیم و ساماریوم هستند. از سوی دیگر، هزینه بالای مواد آهنربای دائم و عرضه محدود آنها به عنوان مشکلات جدی برای آینده صنعت وسایل حمل نقل عمومی شناخته شده است. ماشین‌های القایی به عنوان سیستم محرکه وسایل نقلیه مورد استفاده قرار داد. معروف‌ترین آنها ماشین القایی است که در پیشران خودروهای تسلا مدل‌های قبلی اجرا شده است. ماشین‌های القایی فاقد آهنرباهای دائمی هستند، اما همچنان چگالی توان و کارایی قابل قبولی دارند. ولی در مقایسه با ماشین‌های آهنربای دائمی، کارایی و چگالی توان پایین‌تری دارند [۵].

در نتیجه، مدل‌های جدید خودروهای تسلا، جایگزین موتور سنکرون آهنربای دائم با موتور القایی به عنوان موتور کششی شدند. تحقیقاتی بر روی ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس انجام شد تا به عنوان ماشین‌های القایی یا ماشین‌های آهنربای دائمی در پیشران وسایل نقلیه جایگزین شوند. از مزیت ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس می‌توان به ساختار بسیار ساده و مقاوم در برابر خطا اشاره نمود. روتور ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس فاقد آهنرباهای دائمی و هادی است. در ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس، تنها گشتاور رلوکتانسی وظیفه تولید گشتاور را دارد. در مقایسه با یک موتور آهنربای دائم، ماشین سوئیچ رلوکتانس دارای معایبی مانند سطح پایین چگالی گشتاور، ریپل گشتاور، نویز و لرزش هستند [۶]. برای افزایش مزایا و کاهش معایب ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس اقداماتی انجام شده است. اگر بتوان ماشین سوئیچ رلوکتانس را با روتور و استاتور غیر سگمنتال طراحی کرد و همچنان یک مسیر شار کوتاه در هسته موتور حفظ شود، می‌توان نتایج مناسبی به دست آورد.

برای تحقق این شرایط، مرجع [۷] ساختار جدیدی از یک ماشین الکتریکی را پیشنهاد کرده که ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی نامیده می‌شود. این دستگاه می‌تواند از تاثیر القای مغناطیسی و مسیر شار کوتاه برای افزایش راندمان تبدیل انرژی نیروی تولید شده به حرکت و گشتاور استفاده کند. این ساختار منجر به تغییر اساسی در طراحی موتورهای الکتریکی و بهینه‌سازی آنها می‌شود. در این موتور ساختار یکپارچه و وجود هادی‌های روتور به مسیر شار بسیار کوتاهی منجر می‌شود. همین امر باعث می‌شود یک ماشین الکتریکی با راندمان و گشتاور بالا برای خودرو برقی داشته باشیم. ماشین‌های الکتریکی توان بالا مورد استفاده برای وسایل نقلیه عمومی مانند اتوبوس برقی هستند.



شکل (۱): شماتیک اتوبوس برقی

Figure (1): Electric bus schematic

Table (1): Characteristics of the inductive switched reluctance machine

جدول (۱): مشخصات ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی

شماره	پارامتر	پیشران جلو	پیشران عقب
۱	مدل موتور	موتور سوئیچ رلوکتانس القایی سه فاز ۶/۴	موتور سوئیچ رلوکتانس القایی سه فاز ۶/۴
۲	ولتاژ	۶۰۰ ولت	۶۰۰ ولت
۳	توان	۲۲۰ کیلووات	۲۲۰ کیلووات
۴	ترمز احیا کننده	بله	یله

۲- مشخصات پیشران الکتریکی

یک وسیله نقلیه الکتریکی، تمام چرخ متحرک را می‌توان به موتورهای محرک در میل محرک جلو و عقب یا با نصب چرخ‌های نیرو مانند تویی یا موتورهای کنار چرخ روی چرخ‌ها برای به حرکت در آوردن وسیله نقلیه مجهز کرد. به عنوان یک سیستم قدرت منحصر به فرد، سازه می‌تواند توزیع انعطاف‌پذیر گشتاور را تحقق بخشد و قدرت، هزینه و پایداری وسایل الکتریکی را بهبود بخشد [۸]. طرح پیشنهادی از یک پیشران دو موتوره استفاده می‌کند که به دو موتور محرک نیاز دارد، یکی در قسمت جلو و عقب اتوبوس برقی نصب شود. حداکثر راندمان و راندمان در بارهای مختلف یک موتور باید قبل از انتخاب آن برای کاربرد خودروهای الکتریکی در نظر گرفته شود زیرا موتورها در بارهای مختلف کار می‌کنند. حداکثر راندمان و راندمان در بار ۱۰ درصد برای موتور سوئیچ رلوکتانس القایی بیش از ۸۵ درصد است [۷]. موتور الکتریکی جلو و عقب از نوع موتور سوئیچ رلوکتانس القایی انتخاب شده است. این موتور الکتریکی جدید ساختاری ساده و مقاوم دارد و توسط روغن خنک‌سازی می‌شود. ساختار موتور، به صورت روتور داخلی و یک استاتور بیرونی است، که این مزیت برای موتور محسوب می‌شود. برخی از موتورهای الکتریکی جدید که برای پیشران خودروهای الکتریکی ارائه می‌شوند، ساختار غیرمتعارفی دارند که ساخت موتور الکتریکی را سخت‌تر می‌کند. موتور سوئیچ رلوکتانس القایی به آهنربای دائمی، جاروبک، سنسور نیاز ندارد. کنترل این موتور توسط درایوهای مشابه موتور سوئیچ رلوکتانس معمولی انجام می‌شود. این موتور برای کاربردهای گشتاور بالا انتخاب خوبی هستند. مواد مغناطیسی دارای پدیده هیستریزیس هستند، که انرژی مورد نیاز برای مغناطیس کردن آنها است و در طی فرآیند مغناطیسی و مغناطیس زدایی به صورت گرما ظاهر می‌شود. از این رو مکانیزم خنک‌کننده روغن برای اطمینان از عدم گرمایش غیرعادی موتور استفاده خواهد شد. جدول (۱) مشخصات فنی موتور جلو و عقب را نشان می‌دهد. برخی از مزایای اصلی وسیله نقلیه الکتریکی باتری‌دار این است که به‌طور کامل با یک منبع انرژی ارزان و نسبتاً پایدار کار می‌کند، به دلیل کاهش قطعات متحرک نیاز به تعمیر و نگهداری کمی دارد و استفاده بهینه از انرژی با استفاده از یک منبع انرژی ممکن می‌شود. ارسال گشتاور فقط به محور جلو با نظارت بر شرایط جاده و رفتار رانندگی منطقی است. هنگامی که اتوبوس از حالت سکون در یک ایستگاه شلوغ شروع به کار می‌کند، موتور عقب به احتمال زیاد بار زیادی را تجربه می‌کند و از این رو مقدار زیادی جریان از باتری نیاز دارد. این به‌طور بالقوه می‌تواند به موتور آسیب برساند. برای جلوگیری از این امر، اتوبوس الکتریکی پیشنهادی بار شروع را در بین موتورهای جلو و عقب به‌طور مساوی متعادل می‌کند. در هنگام شتاب‌گیری سخت، وزن به انتهای عقب خودرو منتقل می‌شود که برای جلوگیری از چرخش چرخ‌های جلو، موتور جلو نیاز به کاهش قدرت و گشتاور دارد. نیروی ذخیره شده توسط چرخ‌های جلو در اختیار موتور عقب قرار می‌گیرد که می‌تواند بلافاصله از آن استفاده کند. از سوی دیگر، در هنگام ترمزگیری، موتور جلو گشتاور ترمز احیاکننده و قدرت بیشتری را می‌پذیرد. به این ترتیب است که سیستم تمام چرخ در پیکربندی دو موتوره، برای به حداکثر رساندن گشتاور در پاسخ به شرایط چسبندگی جاده و انتقال وزن در خودرو توزیع می‌کند [۹].

۳- انتخاب توان موتور بر اساس دینامیک خودرو

برای تعیین سطح توان موتور، نیروهای مختلفی به اتوبوس وارد می‌شوند، مانند مقاومت غلتشی و مقاومت کشش آیرودینامیک، باید در نظر گرفته شوند. به‌منظور تخمین توان تحویل داده شده توسط پیشران، نیروی کشش مطابق رابطه (۱)

محاسبه می‌شود [۸] که در آن F_{traction} نیروی کششی، F_{net} نیروی خالص وارد بر اتوبوس، F_{rolling} نیروی غلتشی، $F_{\text{aerodynamic}}$ نیروی آیرودینامیک است.

$$F_{\text{traction}} = F_{\text{net}} + F_{\text{rolling}} + F_{\text{aerodynamic}} \quad (1)$$

مقاومت غلتشی به دلیل اصطکاک بین لاستیک‌ها و سطح محرک ایجاد می‌شود. نیروی مقاومت غلتشی مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود که در آن C_r ضریب مقاومت غلتش، M جرم اتوبوس، g شتاب ناشی از گرانش (۹/۸ متر بر مربع ثانیه)، θ زاویه شیب جاده است.

$$F_{\text{rolling}} = C_r \times M \times g \times \cos(\theta) \quad (2)$$

برای طرح پیشنهادی C_r برابر ۰/۰۱۵ و M برابر ۱۷۵۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. از آنجایی که شیب در طول رفت و آمد در شهر تقریباً افقی باقی می‌ماند، θ برابر صفر است. با جایگزینی این مقادیر در رابطه (۲) نیروی غلتشی برابر ۲۵۷۲/۵ نیوتن است. کشش آیرودینامیک، نیرویی است که بر خلاف حرکت نسبی وسیله نقلیه نسبت به هوایی که در اطراف وسیله نقلیه در حال حرکت است، عمل می‌کند. اگر C_a ضریب کشش آیرودینامیکی، A_f ناحیه جلوی اتوبوس، ρ چگالی هوا و v حداکثر سرعت اتوبوس برقی باشد، نیروی کشش آیرودینامیکی از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$F_{\text{aerodynamic}} = 0.5 \times C_a \times A_f \times \rho \times v^2 \quad (3)$$

برای طرح پیشنهادی، سرعت ۷۵ متر بر ثانیه، ضریب کشش ۰/۷۵، چگالی هوا ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب و ناحیه جلوی اتوبوس ۸/۹ متر مربع و با جایگزینی این مقادیر در رابطه (۳) نیروی آیرودینامیک برابر ۱۷۷۲/۸۰ نیوتن خواهد بود. نیروی خالص وارد بر اتوبوس با استفاده از رابطه (۴) و با جایگزینی مقادیر مقاومت غلتشی و نیروهای کششی آیرودینامیکی در رابطه (۱)، تعیین می‌شود.

$$F_{\text{net}} = M \times a = 17500 \times 0.75 = 13125 \text{ N} \quad (4)$$

بنابراین نیروی کششی با استفاده از رابطه (۱) برابر ۱۷۴۷۱/۳ نیوتن است. موتور برای حرکت دادن وسیله نقلیه باید بر این نیروی کششی غلبه کند. بنابراین، با توجه به فرض این‌که اتوبوس برقی با حداکثر سرعت خود، ۷۵ کیلومتر بر ساعت (۲۰/۸ متر بر ثانیه)، در حال حرکت است، کل قدرت کششی مورد نیاز با رابطه (۵) قابل محاسبه است:

$$P_{\text{traction}} = F_{\text{traction}} \times v = 363.4 \quad (5)$$

تلفات ناشی از انتقال نیرو به چرخ باید لحاظ شود. بنابراین، M_{traction} توان مکانیکی خروجی است که با رابطه (۶) به دست می‌آید که در آن η راندمان سیستم انتقال برابر ۰/۸۵ است [۹].

$$M_{\text{traction}} = \frac{P_{\text{traction}}}{\eta} = \frac{363.4 \text{ kW}}{0.85} \approx 440 \text{ kW} \quad (6)$$

راندمان در یک سیکل رانندگی در شرایط مختلف، در مورد راندمان در یک سیکل رانندگی با توجه به متوسط توان در یک سیکل، راندمان برابر با ۹۵ درصد است. بنابراین، توان الکتریکی مورد نیاز برای اتوبوس برقی ۱۷۵۰۰ کیلوگرم، باید موتوری با توان خروجی ۴۴۰ کیلووات انتخاب شود. وسایل نقلیه الکتریکی با بیش از یک موتور الکتریکی می‌توانند مزایایی در صرفه‌جویی در انرژی باتری‌ها داشته باشند. استراتژی‌های کنترل چندگانه با پیشرانده پیشنهادی سازگار است و می‌تواند در توزیع گشتاور مورد نیاز بین موتورهای الکتریکی استفاده شود [۱۰-۱۳]. موتورهای زیادی برای اتوبوس برقی پیشنهاد شده است. از آنجایی که موتور الکتریکی دارای توان بسیار بالا است، در نتیجه نیاز به مقدار زیادی آهنربای دائم دارد. لذا مطلوب این است که موتور الکتریکی در اتوبوس برقی فاقد آهنربای دائم باشد. موتور انتخاب شده ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی است که می‌تواند راندمان، گشتاور بالا و کنترل خوبی داشته باشد.

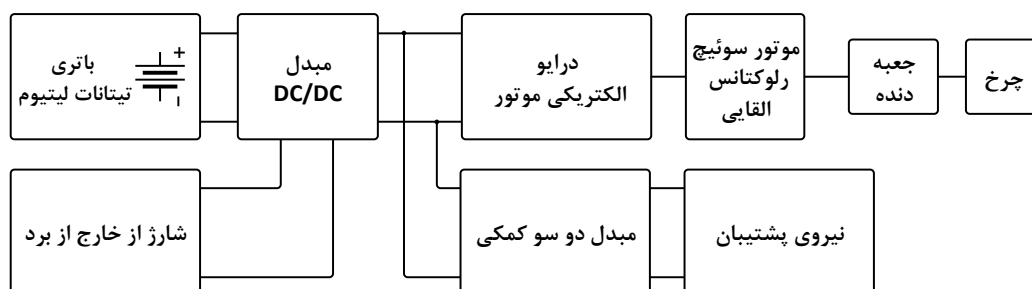
۴- تبدیل انرژی

جریان برق دو طرفه در باس الکتریکی پیشنهادی مورد نیاز است. در هنگام کاهش سرعت و شتاب، باتری باید به ترتیب شارژ و دشارژ شود. در هر دو شرایط، ولتاژها قطبیت خود را تغییر نمی‌دهند. قطبیت با تغییر بزرگی و جهت جریانی که از طریق

سیستم‌های الکترونیک قدرت می‌گذرد، تعویض می‌شود. مبدل‌هایی برای طراحی سیستم تبدیل توان اتوبوس برقی باید استفاده شوند، عبارتند از: مبدل باتری کششی: مبدل دوطرفه DC/DC، درایو موتور: مبدل دوطرفه DC/DC و مبدل باتری کمکی: مبدل DC/DC یک طرفه. اتصال داخلی سلول‌ها سطح ولتاژ سیستم را مشخص می‌کند. در روش تبدیل توان پیشنهادی، خروجی مبدل برق دو جهته DC-DC متصل به باتری، سطح ولتاژ لینک ولتاژ بالا و ورودی اینورتر کششی را مشخص می‌کند. بسیاری از اتوبوس‌های برقی امروزی با اتصال ولتاژ ۷۰۰ تا ۸۰۰ ولت طراحی شده‌اند زیرا نیروی محرکه مورد نیاز بسیار بالاست. همچنین، قطعات الکترونیکی استاندارد از بخش صنعت با مبدل‌های این سطوح ولتاژ سازگار هستند [۱۴]. برای طراحی باس الکتریکی پیشنهادی، توجه به طیف وسیعی از تغییرات ولتاژ ورودی و نسبت تقویت ولتاژ ضروری است. از این رو، مبدل انتخاب شده، یک مبدل گیره بسته فعال با تغذیه جریان است. یکی از مزایای اصلی مبدل تغذیه جریان این است که می‌تواند کلیدزنی ولتاژ صفر را در تغییرات گسترده ولتاژ ورودی حفظ کند. همچنین در کاهش بار در ولتاژ ورودی بالا از دست دادن کلیدزنی ولتاژ صفر وجود دارد. مبدل پیشنهادی دارای کاربردهای بالقوه مختلفی مانند مبدل‌های DC-DC جلویی و مبدل‌های دو طرفه است که برای طراحی باس الکتریکی مناسب هستند [۱۷-۱۵]. مطابق شکل (۲)، ورودی مبدل DC-DC به باتری متصل می‌شود و خروجی آن مستقیماً به لینک ولتاژ بالا تغذیه می‌شود. پس از تنظیم چندین پارامتر در مدار، مشخص شد که با تنظیم ولتاژ ورودی روی ۸۰ ولت و نسبت سیم پیچ ترانسفورماتور روی ۰/۲۷، مدار خروجی ۷۴۱/۳۸ ولت را ارائه می‌دهد. اکنون با در نظر گرفتن ولتاژ نامی سلول هر سلول باتری ۲/۳ ولت، برای تشکیل بسته باتری به ۳۵ سلول نیاز دارد.

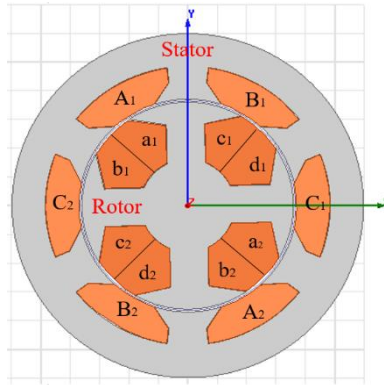
۵- ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی

ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی (ISRM)، یک ماشین الکتریکی جدید با ساختاری ساده دارد. ساختار موتور، به صورت روتور داخلی و یک استاتور بیرونی است. این یک مزیت برای این ماشین است، زیرا برخی از ماشین‌های الکتریکی جدید که برای پیشرانه خودروهای الکتریکی ارائه می‌شوند، ساختار غیرمتعارفی دارند که ساخت ماشین را سخت‌تر می‌کند. روتور ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی شامل سیم‌پیچ‌هایی است که اتصال کوتاه شده‌اند. سیم‌پیچ‌های روتور از منبع خارجی تغذیه نمی‌شوند، اما در حین حرکت روتور، جریان به آنها القا می‌شود. در طول چرخش روتور، نیروی محرکه مغناطیسی تولید شده توسط سیم‌پیچ‌های روتور از عبور شار از یوغ روتور جلوگیری می‌کند و منجر به ایجاد یک مسیر شار کوتاه می‌شود. ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی را می‌توان با تعداد قطب‌های متنوع طراحی کرد. بسته به تعداد قطب‌های استاتور و روتور، نحوه سیم‌بندی ماشین هم متفاوت خواهد بود. به عنوان مثال، برخی از پیکربندی‌ها، سیم‌پیچ استاتور و روتور دارای گام کامل هستند و برخی دیگر سیم‌پیچ‌های استاتور گام کامل و سیم‌پیچ روتور گام کوتاه است [۷]. شکل (۳) شماتیک ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی سه فاز ۶/۴ را نشان می‌دهد. در این مقاله، یک موتور سوئیچ رلوکتانس القایی سه فاز با توان ۲۲۰ کیلووات، با ۶ قطب استاتور و ۴ قطب روتور در نظر گرفته شده است. یک مدل المان محدود دوبعدی طراحی شده و تجزیه تحلیل مغناطیسی آن انجام می‌گیرد. مسیر شار، گشتاور و بازده موتور سوئیچ رلوکتانس القایی محاسبه شده و نتایج ارائه شده است.

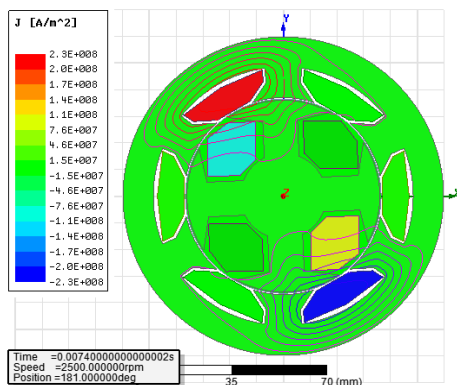


شکل (۲): شماتیک تبدیل توان

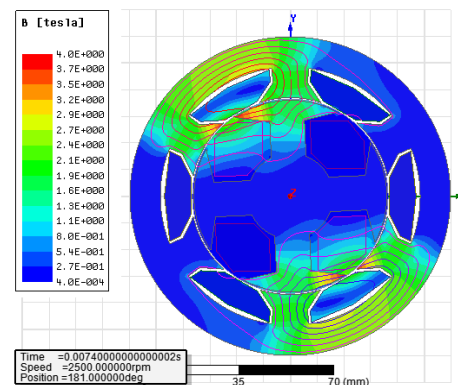
Figure (2): Schematic of power conversion



شکل (۳): ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی سه فاز ۶/۴
Figure (3): Three-phase inductive switched reluctance machine 4/6



شکل (۵): توزیع جریان ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی
Figure (5): Current distribution of ISRM



شکل (۴): توزیع شار ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی
Figure (4): Flux distribution of ISRM

۵-۱- شبیه‌سازی ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی

مدل دو بعدی ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی با مشخصات جدول (۲) در نرم‌افزار انسیس ماکسول شبیه‌سازی می‌شود. فاز اول ماشین سوئیچ رلوکتانس تحریک می‌شود و روتور با سرعت ۲۵۰۰ دور در دقیقه می‌چرخد. پس از شبیه‌سازی موتور به روش گذرا، شار مغناطیسی محاسبه و نتایج آن ارائه می‌گردد. نتایج توزیع شار و جریان در شکل‌های (۴) و (۵) قابل مشاهده است. تجزیه و تحلیل ماشین سوئیچ رلوکتانس به روش اجزای محدود گذرا به این صورت است که فاز اول در جریان ۴۰۰ آمپر و در سرعت ۲۵۰۰ دور در دقیقه تحریک می‌شود. موقعیت روتور از همپوشانی کامل تا همپوشانی کامل ۴۵ درجه است.

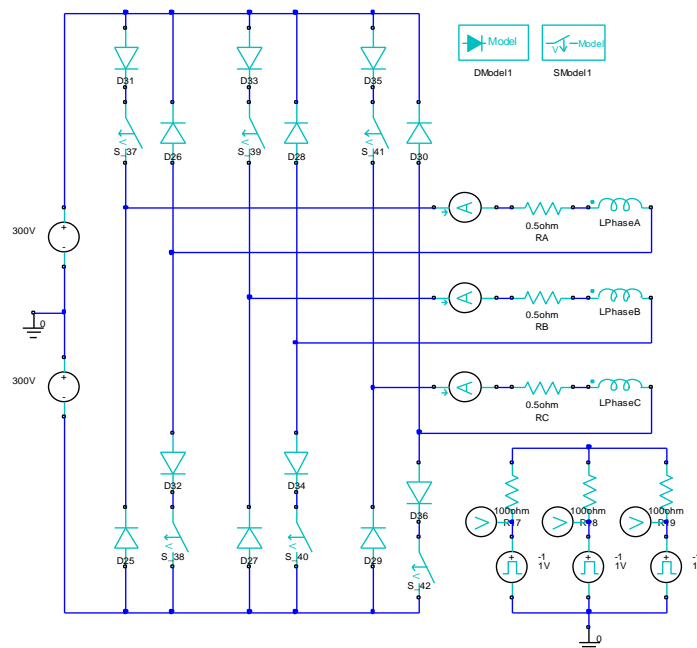
۵-۲- درایو ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی

درایو موتور سوئیچ رلوکتانس القایی شامل چندین برد الکترونیکی است. میکروکنترلر، به عنوان یک کنترل‌کننده برای تولید پالس‌های گیت کافی برای روشن و خاموش کردن سوئیچ‌ها در زمان مناسب استفاده می‌شود. یک مبدل تمام پل به عنوان مدار کلیدزنی در نظر گرفته می‌شود. یک مدار اسنابر برای محدود کردن بیش از حد ولتاژ و محافظت از سوئیچ‌ها استفاده می‌شود. هنگامی که کلیدهای مناسب روشن می‌شوند، فاز استاتور مربوطه تحریک می‌شود. هنگامی که یک فاز تحریک می‌شود، روتور ۳۰ درجه می‌چرخد، از موقعیت غیر هم تراز به سمت موقعیت تراز حرکت می‌کند. هنگامی که روتور به موقعیت تراز نزدیک شود، کلیدها خاموش می‌شوند. انرژی ذخیره شده در سیم‌پیچ‌های تحریک جریان را در همان جهت نگه می‌دارد تا زمانی که این انرژی به طور کامل از بین برود. به دنبال ادامه تحریک، یک الگوی تحریک در خلاف جهت عقربه‌های ساعت منجر به چرخش روتور در جهت عقربه‌های ساعت می‌شود و بالعکس. عملکرد در حالت ترمز ژنراتوری، با توجه به شباهت اصول عملکردی موتور سوئیچ رلوکتانس القایی به سوئیچ رلوکتانس معمولی، عملکرد ترمزی ژنراتوری آن نیز عیناً همانند ماشین

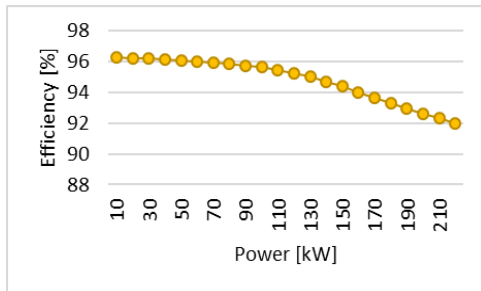
سوئیچ رلوکتانس معمولی است. برای آنکه موتور بتواند در همه زوایای روتور، گشتاور راه‌اندازی مناسب و کافی داشته باشد باید همپوشانی کامل بین تغییرات اندوکتانس فازهای مجاور وجود داشته باشد. گشتاور تولید شده در ماشین سوئیچ رلوکتانس، متناسب با مجذور جریان تحریک فاز بوده، پس مستقل از جهت جریان است، لذا جریان تحریک موتور می‌تواند یک‌طرفه باشد، این مسئله باعث ساده‌تر شدن مدارهای کنترلی موتور نسبت به سایر موتورها می‌گردد. در شکل (۵) مدار مورد استفاده در شبیه‌سازی موتور سوئیچ رلوکتانس سه فاز نشان داده شده است. نتایج گشتاور القایی، راندمان، میانگین گشتاور تولید شده، جریان القایی یک سیم‌پیچ، گشتاور دینامیکی و تلفات مسی برای ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی به ترتیب در شکل‌های (۷) الی (۱۲) ارائه شده است. گشتاور راه‌اندازی، با توجه به شباهت منحنی گشتاور موتور سوئیچ رلوکتانس القایی به شکل‌های (۷) رلوکتانس معمولی، گشتاور راه‌اندازی آن نیز همانند ماشین سوئیچ رلوکتانس معمولی تعیین می‌گردد. یعنی منحنی گشتاور ارائه شده برای ماشین سوئیچ رلوکتانس معمولی لحاظ می‌گردد و بسته به موقعیت روتور اندازه آن تعیین می‌شود. این کار عیناً شبیه ماشین سوئیچ رلوکتانس معمولی است. در مورد گشتاور شتاب‌گیری نیز همین نکته قابل اعمال است. در حالی که روتور حرکت می‌کند، جریان در سیم‌پیچ‌های روتور القا می‌شود. تحلیل جریان القایی در سیم‌پیچ‌های روتور با استفاده از روش اجزا محدود انجام می‌شود. جریان فاز اول جریان ۴۰۰ آمپر و سرعت روتور ۲۵۰۰ دور در دقیقه در نظر گرفته شده است. جریان القایی یکی از سیم‌پیچ‌های روتور در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در واقع، جریان در سیم پیچ روتور که تحت فاز استاتور برانگیخته است، القا می‌شود. اولاً، هنگامی که روتور در موقعیت غیرتراز قرار دارد، جریان القایی در سیم‌پیچ روتور برابر با جریان فاز استاتور است. جریان القایی در سیم‌پیچ‌های روتور متغیر است و زمانی که روتور از موقعیت غیرتراز به سمت موقعیت تراز حرکت می‌کند، از بین می‌رود.

۶- نتیجه‌گیری

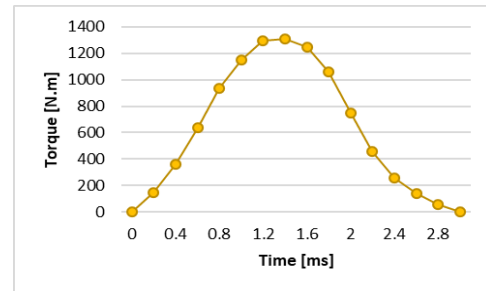
صنعت اتوبوس برقی در حال حاضر در مرحله نمونه اولیه قرار دارد، که در آینده زمینه پیشرفت زیادی را برای اتوبوس‌ها و باتری‌ها و همچنین کاهش قیمت آنها فراهم می‌کند. همچنین از شارژرهای سریع نیز می‌توان چنین پدیده‌ای را انتظار داشت. در حال حاضر فناوری فعلی می‌تواند در مقایسه با اتوبوس‌های دیزلی سنتی صرفه جویی در هزینه ایجاد کند. از دیدگاه زیست-محیطی، این طرح عملاً برای عملکرد در یک کلان شهر امکان‌پذیر است. با توجه به شرایط جایگزینی اتوبوس برقی به جای حمل و نقل عمومی، در این مقاله موتور سوئیچ رلوکتانس القایی ۲۲۰ کیلووات مورد استفاده اتوبوس برقی معرفی شده است.



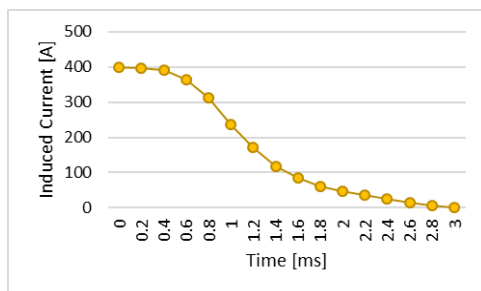
شکل (۶): مدار سوئیچینگ ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی سه فاز ۶/۴ در انسیس ماکسول
Figure (6): The switching circuit of the three-phase inductive switched reluctance machine 4/6



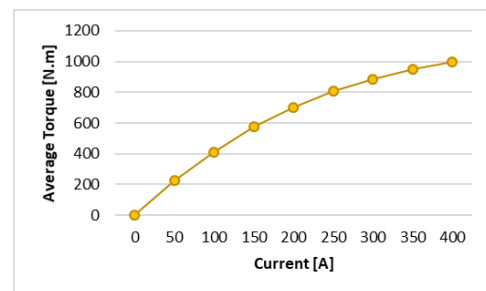
شکل (۸): راندمان در توان‌های خروجی مختلف
Figure (8): Efficiency in different output powers



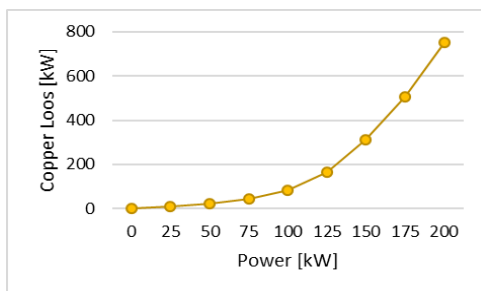
شکل (۷): گشتاور کل ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی
Figure (7): The total torque of the inductive reluctance switch machine



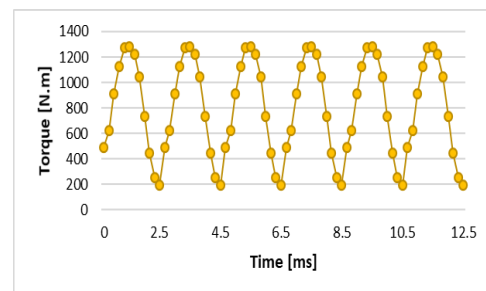
شکل (۱۰): جریان القایی یکی از سیم پیچ‌های روتور
Figure (10): Induction current of one of the rotor coils



شکل (۹): میانگین گشتاور در جریان‌های مختلف
Figure (9): Average torque in different currents



شکل (۱۲): تلفات مسی در توان‌های خروجی مختلف
Figure (12): Copper losses in different output powers



شکل (۱۱): گشتاور دینامیکی در یک سیکل کامل
Figure (11): Dynamic torque in a complete cycle

ساختار روتور به گونه‌ای طراحی شده که مسیر شار بسیار کوتاه شود. این امر باعث افزایش گشتاور بالا و کاهش تلفات می‌شود. مدل دو بعدی تجزیه و تحلیل اجزای محدود موتور سوئیچ رلوکتانس القایی و نتایج ارائه شده است. سپس تجزیه و تحلیل الکترومغناطیسی و حرارتی یک ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی ۶/۴ انجام و نتایج این موتور که شامل چگالی گشتاور و راندمان است ارائه شد. از ویژگی‌های مهم این موتور می‌توان برای افزایش سرعت خودروهای برقی استفاده کرد. از قدرت بالا و همچنین راندمان بالا می‌توان بهره برد و مزیت دیگر، درایو آن است که از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است. نتایج نشان می‌دهد که موتور سوئیچ رلوکتانس القایی توان بالا جهت پیشرانده اتوبوس برقی از نظر فنی امکان‌پذیر هستند و اقتصادی خواهد بود.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دوره دکتری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان) است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

- [1] S.A. Seyed-Beheshti-Fini, S.M. Shariatmadar, V. Amir, "Frequency control in multi-carrier microgrids with the presence of electric vehicles based on adaptive neuro fuzzy inference system controller", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 55, pp. 27-42, December 2023 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1402.14.55.3.1).
- [2] R.W. Wimbadi, R. Djalante, A. Mori, "Urban experiments with public transport for low carbon mobility transitions in cities: A systematic literature review (1990–2020) ", *Sustainable Cities and Society*, vol. 72, Article Number: 103023, Sept. 2021 (doi: 10.1016/j.scs.2021.103023).
- [3] G. Papa, M. Santo Zarnik, V. Vukašinović, "Electric-bus routes in hilly urban areas: Overview and challenges", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 165, Article Number: 112555 Sept. 2022 (doi: 10.1016/j.rser.2022.112555).
- [4] Y. Liu, X. Feng, Y. Yang, Z. Ruan, L. Zhang, K. Li, "Solving urban electric transit network problem by integrating Pareto artificial fish swarm algorithm and genetic algorithm", *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 253-268, Nov 2020 (doi: 10.1080/15472450.2020.1848561).
- [5] G. Artetxe, D. Caballero, B. Prieto, M. Martinez-Iturralde, I. Elosegui, "Eliminating rare earth permanent magnets on low- speed high- torque machines: A performance and cost comparison of synchronous reluctance machines, ferrite permanent magnet- synchronous reluctance machines and permanent magnet synchronous machines for a direct- drive elevator system", *IET Electric Power Applications*, vol. 15, no. 3, pp. 370-378, Feb. 2021 (doi: 10.1049/elp2.12032).
- [6] D. Xiao, S.R. Filho, G. Fang, J. Ye, A. Emadi, "Position-sensorless control of switched reluctance motor drives: A review", *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 1, pp. 1209-1227, March 2022 (doi: 10.1109/TTE.2021.3110867).
- [7] M. Abbasian, "Induction switched reluctance motor", U.S. Patent, US20170370296A1, June 2020.
- [8] X. Wu, D. Zheng, T. Wang, J. Du, "Torque optimal allocation strategy of all-wheel drive electric vehicle based on difference of efficiency characteristics between axis motors", *Energies*, vol. 12, no. 6, Article Number: 1122, March 2019 (doi: 10.3390/en12061122).
- [9] H. Cui, J. Ruan, C. Wu, K. Zhang, T. Li, "Advanced deep deterministic policy gradient based energy management strategy design for dual-motor four-wheel-drive electric vehicle", *Mechanism and Machine Theory*, vol. 179, Article Number: 105119, Jan. 2023 (doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.105119).
- [10] H.W. Kim, A. Amarnathvarma, E. Kim, M.H. Hwang, K. Kim, H. Kim, H.R. Cha, "A novel torque matching strategy for dual motor-based all-wheel-driving electric vehicles", *Energies*, vol. 15, no. 8, Article Number: 2717, April 2022 (doi.org/10.3390/en15082717).
- [11] X. Yu, C.Lin, M. Zhao, J. Yi, Y. Su, H. Liu, "Optimal energy management strategy of a novel hybrid dual-motor transmission system for electric vehicles", *Applied Energy*, vol. 321, Article Number: 119395, Sept. 2022 (doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119395).
- [12] W. Cui, T. Si, X. Li, X. Li, L. Lu, T. Ma, Q. Wang, "A review of architectures and control strategies of dual-motor coupling powertrain systems for battery electric vehicles", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 162, July 2022 (doi: 10.1016/j.rser.2022.112455).
- [13] D. Wang, Z. Feng, H. Zheng, X. Wang, "Comparative analysis of different topologies of linear switched reluctance motor with segmented secondary for vertical actuation systems", *IEEE Trans on Energy Conversion*, vol. 36, no. 4, pp. 2634-2645, Dec. 2021 (doi: 10.1109/TEC.2021.3070563).
- [14] A. Ayad, N.A. El-Taweel, H.E. Farag, "Optimal design of battery swapping-based electrified public bus transit systems", *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, vol. 7, no .4, pp. 2390-2401, Dec. 2021 (doi: 10.1109/TTE.2021.3083106).
- [15] S. Sankarananth, P. Sivaraman, "Performance enhancement of multi-port bidirectional DC-DC converter using resilient backpropagation neural network method", *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 36, no. 4, Dec. 2022 (doi: 10.1016/j.suscom.2022.100783).
- [16] D. Karamalian, B. Majidi, M.R.Yousefi, "Rotor design and analysis of 4/2 SRMs to produce continuous torque using finite element method", *Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 8, no. 32, pp. 13-20, Sept. 2017 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1396.8.32.2.2)
- [17] S.B. Chikkannanavar, J.H. Kim, W. Jung, "Degradation and life performance of transition metal oxide cathodes used in lithium- I on batteries", *Transition Metal Oxides for Electrochemical Energy Storage*, vol. 12, no. 6, pp. 257-272, April 2022 (doi: 10.1002/9783527817252.ch10).